

초음파 감쇠계수에 의한 균열길이의 측정

정 남 용* · 박 성 일*

(2003년 5월 22일 접수, 2004년 2월 24일 심사완료)

Measurement of Crack Length by Ultrasonic Attenuation Coefficient

Nam Yong Chung and Sung Il Park

Key Words: Acoustic Impedance(음향 임피던스), Attenuation Coefficient(감쇠계수), Compliance(컴플라이언스), Double-Cantilever Beam(이중 외팔보), Energy Release Rate(에너지 방출률), Transmission Coefficient(투과율), Ultrasonic Test(초음파 탐상)

Abstract

In this paper, the ultrasonic attenuation coefficient was measured by variation of crack length for double-cantilever beam(DCB) specimen. The energy release rate, G , was obtained by the experimental measurement of compliance. The experimental results represents that the crack length for the ultrasonic attenuation coefficient and energy release rate is increases proportionally. From the experimental results, we proposed a detecting method of the crack length by the ultrasonic attenuation coefficient and discussed it.

1. 서론

최근 수년동안 국내·외적으로 대형구조물의 붕괴사고가 빈번히 발생하고 있다. 이들 붕괴사고의 가장 중요한 것은 여러 가지 원인들 중에서도 구조물 내부에 존재하는 균열에 의한 것이다. 대부분의 구조물은 사용 시간이 경과함에 따라 내재된 균열선단에 현저한 응력집중으로 인해 균열진전이 발생하여 결국 붕괴에 이르게 된다. 그러므로, 구조물의 붕괴를 방지하고 이로 인한 경제적 손실을 줄이기 위해서는 균열을 조기에 검출하는 것이 무엇보다도 중요하다. 균열을 검출

하는 방법중에 초음파를 이용한 비파괴 평가 기술은 구조물에 손상을 가하지 않고 내부균열을 정확하게 검출하는 것으로 널리 사용되고 있는 방법이다.^(1~12) 구조물에서 응력집중이 발생하는 균열에 초음파를 적용할 경우에는 탐상 주파수 및 밀도와 초음파 속도에 의한 음향임피던스 ($Z = \rho C$)의 차를 고려하여야 한다. 또한, 균열선단의 변위 및 균열길이에 따라 초음파 산란이 발생하고 이로 인해 음압이 현격히 감소하여 초음파 감쇠계수의 변화가 발생한다. 그러나 지금까지 발표되고 있는 여러 연구 결과를 보면, 재료의 결정입자 크기의 변화에 따른 감쇠의 측정과 수침법을 이용하여 재료를 변화시켜가면서 산란과 감쇠를 측정한 결과가 발표되고 있다. Kline⁽¹³⁾은 초음파 분광 기술을 이용한 산란과 감쇠 측정에 대해 연구하였고, Ping⁽¹⁴⁾은 음향 반사와 투과 펄스를 이용하여 재료에 대한 산란과 감쇠를 측정하였다. 그러나, 실제적으로 균열이 내재되어 있는 경우에 초음파 감쇠계수와 균열이 진전하면

† 책임저자, 회원, 숭실대학교 기계공학과

E-mail : nychung@hanmail.net

TEL : (02)820-0660 FAX : (02)825-6263

* 회원, 숭실대학교 대학원 기계공학과

서 발생하는 에너지 방출률의 상호 관계를 연구한 결과는 보고되지 않고 있다.

따라서, 본 연구에서는 균질재인 알루미늄(Al) 합금을 이용하여 균열길이의 변화에 따라 균열진전을 측정할 수 있는 DCB(double-cantilever beam) 시험편을 고안·제작하였고, 접촉매질, 모재로 조합되어진 2개층에서의 음압투과율 식을 이용하여 초음파 감쇠에 영향을 미치는 인자를 도출하였다. 균열길이 변화에 따른 컴플라이언스를 측정하여 균열 발생에 의한 에너지 방출률을 구하였다. 또한, 균열길이에 따른 초음파 에코의 비와 에너지 방출률 및 초음파 감쇠계수의 관계를 비교·검토하고, 이를 토대로 초음파 감쇠계수에 의한 균열길이를 측정할 수 있는 방법을 제시하고자 한다.

2. 실험

2.1 시험편의 형상 및 치수

초음파 감쇠계수에 의한 균열길이를 측정하기 위하여 Fig. 1과 같은 형상 및 치수로 DCB 시험편을 제작하였다. 모재는 균질재로 알루미늄 합금을 사용하였고, 전체길이는 $L=135$ mm로 하였다. 균열길이 a 는 13.5 mm, 27 mm, 40.5 mm, 54 mm, 67.5 mm 로 각각 변화 시켰다. 재료의 물성치 및 초음파 특성은 각각 Table 1과 Table 2에 나타내었다.

2.2 실험방법

만능재료시험기(Hounsfield H10KT)를 사용하여 편 하중을 작용시키고, 하중제어 방식으로 하중속도는 0.1 mm/min으로 하였다. 하중-하중점 변위선도는 X-Y 레코더를 사용하여 기록하였고, 하중점의 변위는 클립 게이지를 사용하여 측정하였다. 각 시험편마다 실험에서 기록된 하중-하중점 변위 선도로부터 각 균열길이에 대한 컴플라이언스(compliance)를 구하였고, 피로 예비균열은 ASTM E813-89에 준하여 삽입한 후, 하중에 따른 균열길이를 구하여 에너지 방출률을 계산하였다. 이때, 균열길이 변화에 따른 초음

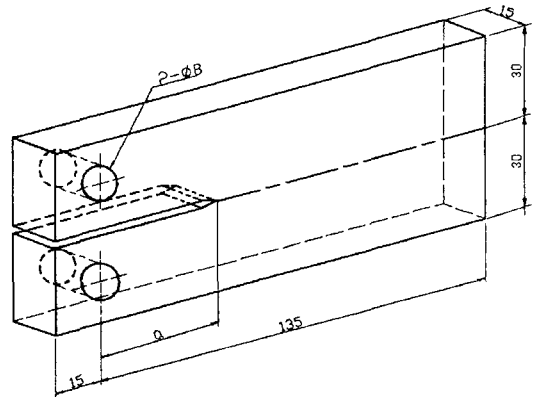


Fig. 1 Shape and dimension of DCB specimen

Table 1 Material properties of DCB specimen

Material properties Specimen materials	Density ρ (10^3 kg/m ³)	Young's modulus E(GPa)	Poisson's ratio ν
Al	2.70	65.56	0.32

Table 2 Ultrasonic properties of DCB specimen

Material properties Specimen materials	Velocity, C (m/s)		Impedance Z (10^6 kg/m ² s)
	Longitudinal wave C_L	Shear wave C_S	
Al	6,260		16.90
	3,080		
Couplant	Glycerin	1,880	2.40

파 감쇠계수를 측정하였다. 초음파 탐상기(Sitescan 240)와 진동자 8×9 mm, 주파수 4MHz, 굴절각 45°인 횡파경사각 탐촉자를 사용하였다. 탐상감도는 BS(British Standard) 블록(block) A4를 사용하여 감도를 80%로 맞추어 교정하였고, 접촉매질은 글리세린을 사용하였다. 탐촉자의 부착위치 및 초음파 전파경로는 균열선단에서 입사점으로부터 초음파 에코가 최대를 나타내는 0.5 스킵에서의 위치와 음압으로 하였다. Al 시험편에서의 균열길이에 따른 음압 차는 대비 시험편에서의 음압과 초음파 탐상에서 발생하는 제1회 반사 에코와 제2회 반사 에코의 비로 계산하였다.

3. 에너지 방출률과 음압투과율 및 초음파 감쇠계수의 검토

3.1 컴플라이언스와 에너지 방출률

에너지 방출률은 컴플라이언스를 실험에서 직접 측정하여 구할 수 있다. 두께 B , 균열길이 a 인 탄성체에 정적하중 P 가 작용하여 균열이 da 만큼 진전하였을 때 하중-하중점 변위선도에서 컴플라이언스 C 와 변위 δ 는 다음 식과 같이 된다.

$$C = \frac{\delta}{P} \quad (1)$$

또한, 에너지 방출률 G 와 컴플라이언스 C 는 다음 식으로 표시된다.

$$G = \frac{dU}{dA} = \frac{1}{B} \frac{dU}{da} = \frac{P^2}{2B} \frac{dC}{da} \quad (2)$$

여기서, U 는 균열진전에 의해 소비되는 탄성변형에너지를 의미하고, A 는 균열의 진전 면적이다.

3.2 초음파 경사 입사시 음압반사율과 투과율

초음파가 매질에 경사입사할 때 반사하는 문제는 각 재질의 음향 임피던스에 따른 음압을 고려하여야 한다. 따라서, 초음파가 접촉매질층인 매질 1로부터 모재인 매질 2로 경사 입사할 때 발생하는 음압반사율(r)은 다음 식과 같이 된다.

$$r = \frac{Z_2 \cos i_L - Z_1 \cos \theta_L}{Z_2 \cos i_L + Z_1 \cos \theta_L} \quad (3)$$

여기서, $Z = \rho C$ 이고, ρ 는 밀도, C 는 재질의 초음파 속도를 의미한다. 또한, i_L , θ_L 은 각각 종파 입사각 및 굴절각이고, Z_i 는 각 매질의 음향 임피던스를 나타낸다.

초음파가 균질체에 경사각을 가지고 투과할 때 발생하는 음의 퍼짐 현상으로 인해 작은 음원이 있는 것과 동일한 거동을 나타내기 때문에 매질의 밀도와 초음파 속도에 의한 음향 임피던스와 입사각과 굴절각을 고려하여야 한다. 다음 식은

초음파가 매질 1로부터 매질 2로 경사 입사하는 경우의 음압투과율(t)을 나타낸다.

$$t = \frac{2Z_2 \cos i_L}{Z_2 \cos i_L + Z_1 \cos \theta_L} \quad (4)$$

3.3 초음파 감쇠계수

초음파가 매질에 입사할 때 감쇠에 의한 음압의 변화는 지수 함수에 의해 감소한다.

ASTM E.664-78에서 모재 및 접촉매질로 구성 되어진 매질 1과 매질 2에서 접촉매질의 초음파 감쇠의 영향이 전혀 고려되지 않은 걸보기 감쇠계수(α_0)는 다음 식과 같이 표시된다.

$$\alpha_0 = 20 \frac{1}{2h} \log \frac{H_0}{H_n} \quad (5)$$

여기서, H_0 는 초기 음압, H_n 는 균열선단에서 중심 음파의 빔거리(n)가 0.5 스킵에서 전반사 하였을 때의 음압을 나타내고, h 는 시험편의 높이이다.

실제 측정에서 초음파가 입사할 때 접촉매질에 의해 탐촉자와 시험편 사이에 일정 두께의 막이 형성되므로, 이러한 접촉매질에 의한 감쇠와 초음파가 입사할 때 발생하는 감쇠를 모두 고려한 감쇠계수(α)는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.⁽¹⁵⁾

$$\alpha = 20 \frac{1}{4h} \log r_e^2 r_p^2 \left| \frac{H_n - H_{n+1}}{H_{n+1} - H_{n+2}} \right| \quad (6)$$

여기서, r_e 는 접촉매질에서의 음압반사율, r_p 는 모재에서의 음압반사율을 나타낸다.

식 (6)은 선형 초음파의 관점에서 해석한 것으로 균질체의 초음파 감쇠계수를 결정하는데 사용되며, 본 실험에서는 식 (6)을 적용하여 균열길이 변화에 따른 초음파 감쇠계수를 측정하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 DCB 시험편의 컴플라이언스

Fig. 2는 실험에서 측정된 하중과 하중점의 변

위를 사용하여 컴플라이언스를 구한 후, 균열길이의 변화에 대한 컴플라이언스와 보(beam)에 대한 이론식을 비교하여 나타내었다. 균질재의 DCB 시험편에 대한 보의 이론식에 의한 컴플라이언스는 다음 식과 같이 된다.

$$C = \frac{\delta}{P} = \frac{8a^3}{Eh^3B} \quad (7)$$

여기서, E 는 세로 탄성계수를 나타낸다.

컴플라이언스의 변화는 균열길이의 증가에 따라 곡선적으로 증가한다. 인공균열 및 피로 예비균열과 보의 이론에서 구한 컴플라이언스가 매우 잘 일치하고 있다.

4.2 DCB 시험편의 에너지 방출률

DCB 시험편에 대한 실험결과인 Fig. 2의 컴플라이언스와 보에 대한 이론식을 식 (2)에 대입하여 에너지 방출률을 계산하였다. 또한, Srawley 식에 의한 에너지 방출률은 식 (8)을 이용하여 구하였다.⁽¹⁶⁾

$$G_I = \frac{(1-\nu^2)K_1^2}{E} \quad (8)$$

$$K_1 = \frac{2\sqrt{3}Pa}{B\sqrt{h^3}}$$

여기서, K_1 은 모드 I 응력세기계수이고, ν 는 푸아송비를 나타낸다.

이때, 에너지 방출률은 실험 및 이론식에 의한 컴플라이언스를 균열길이에 대하여 최소 자승법을 이용하여 2차 근사식을 구한 후, 이를 미분하여 식 (2)에 적용하여 구하였다.

Fig. 3은 실험값과 Srawley 식 및 보에 대한 이론식을 적용한 에너지 방출률을 비교 도시하였다. 보에 대한 이론식과 Srawley 식에 의한 에너지 방출률은 거의 동일하게 곡선적으로 증가한다. 실험으로 구한 에너지 방출률은 균열길이가 증가할수록 이들과의 차이가 커지는데, 이것은 균열길이가 길어질수록 균열선단에서의 하중점의 회전량이 커지기 때문이다.

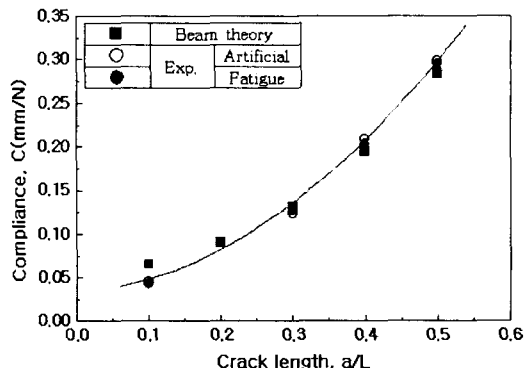


Fig. 2 Relation between compliance and crack length

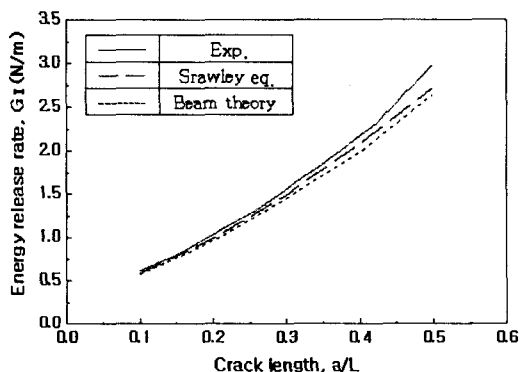


Fig. 3 Relation between energy release and crack length

4.3 균열길이와 초음파 에코의 비

Fig. 4는 실험으로 구한 컴플라이언스, 초음파 에코의 비와 균열길이를 무차원하여 나타내었다. 균열길이가 길어질수록 컴플라이언스는 증가하지만, 초음파 에코의 비는 감소한다.

Fig. 5는 Fig. 4에서 실험으로 구한 컴플라이언스의 측정결과에 따른 초음파 에코의 변화를 나타내고 있다. 초기 균열 상태와 균열이 진전하였을 때의 초음파 에코를 비교하여 보면, 균열이 진전할수록 음압의 현저한 차이로 인해 초음파 에코가 감소한다.

균열이 진전할 때 발생하는 에너지 방출률은

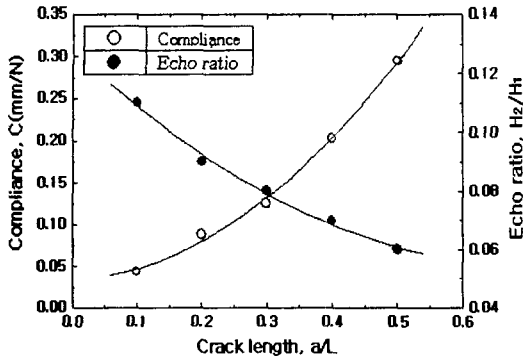


Fig. 4 Relation between compliance and echo ratio versus crack length

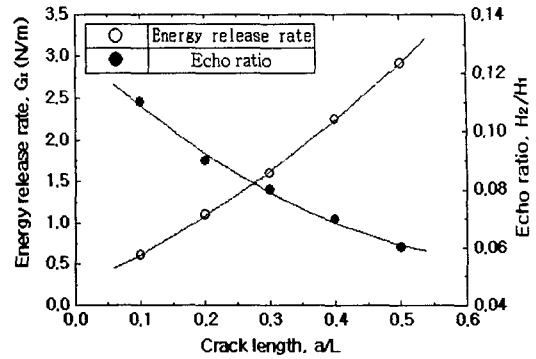
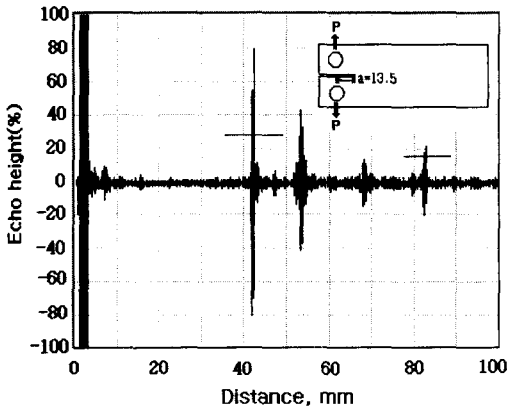
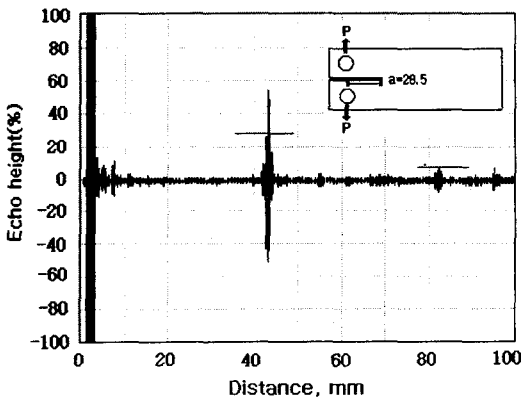


Fig. 6 Relation between energy release rate and echo ratio versus crack length



(a) Crack length 13.5 mm



(b) Crack length 28.5 mm

Fig. 5 Ultrasonic waveform on the DCB specimen

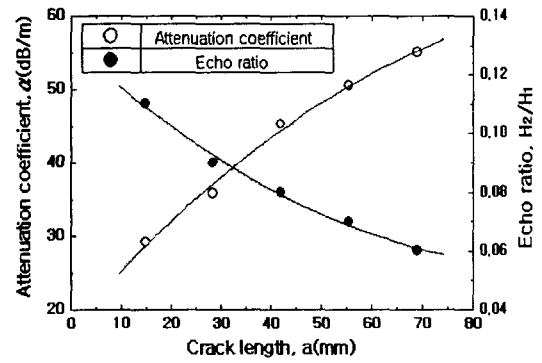


Fig. 7 Relation between attenuation coefficient and echo ratio versus crack length

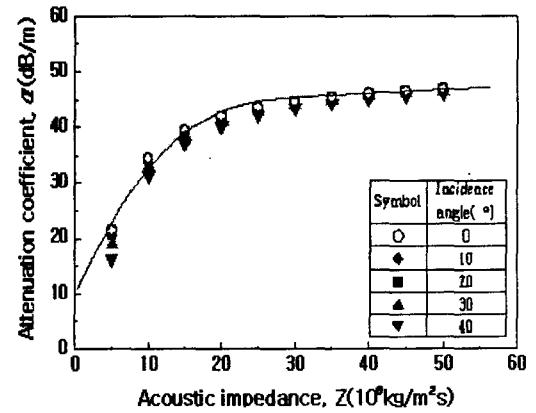


Fig. 8 Relation between attenuation coefficient and acoustic impedance

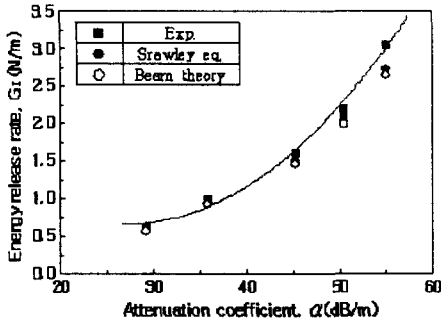


Fig. 9 Relation between energy release rate and attenuation coefficient

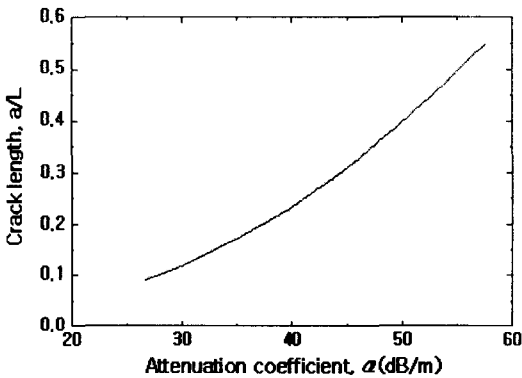


Fig. 10 Relation between crack length and attenuation coefficient

Fig. 6에서 알 수 있듯이 균열이 진전하여 균열 길이가 길어질수록 에너지 방출률은 증가하고, 초음파 에코의 비는 반대로 감소한다. 따라서, 균열길이에 따른 컴플라이언스와 에너지 방출률은 초음파 에코의 비와 반비례 관계를 나타낸다.

Fig. 7은 균열길이에 따른 초음파 감쇠계수와 초음파 에코의 비와의 관계를 나타낸 것이다. 균열길이가 증가할수록 초음파 감쇠계수도 증가하지만 초음파 에코의 비는 균열길이의 증가에 따라 상대적으로 감소하는 반비례 관계를 알 수 있다.

4.4 음향 임피던스와 초음파 감쇠계수

Fig. 8은 초음파 감쇠계수에 영향을 미치는 인자 중 음향임피던스의 변화에 따른 초음파 감쇠

계수의 관계를 나타낸 것이다. 초음파 감쇠계수는 입사각의 변화에 따라 음향임피던스가 0~25 ($10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$) 범위에서는 음향임피던스의 변화에 큰 영향을 받지만, 그 이상에서는 거의 영향을 받지 않고 일정한 값을 나타낸다.

또한, 균질재인 경우 초음파 입사각을 변화 시켜도 음압의 차이는 미세하여 초음파 감쇠계수에 거의 영향을 미치지 않는다. 따라서, 초음파가 접촉매질을 통과하여 모재에 경사 입사할 때 발생하는 음압투과율은 입사각에 거의 영향을 받지 않는다.

4.5 균열길이와 초음파 감쇠계수와의 관계

Fig. 9는 초음파 감쇠계수와 에너지 방출률의 관계를 나타낸 것이다. 초음파 감쇠계수가 증가할수록 에너지 방출률은 곡선적으로 증가한다.

실험과 Srawley 식 및 보에 대한 이론식에 의해 구하여진 에너지 방출률(G_I)과 초음파 감쇠계수(α)와의 관계를 유도하면 다음과 같다.

$$G_I = 0.00016 \alpha^3 - 0.017 \alpha^2 + 0.671 \alpha - 8.248 \quad (9)$$

Fig. 10은 초음파 감쇠계수에 대한 균열길이의 관계를 도시한 것이다. 초음파 감쇠계수가 증가할수록 균열길이도 비례적으로 증가함을 알 수 있다. 초음파 감쇠계수가 증가한다는 것은 초음파 에코의 비가 상대적으로 감소하는 것을 의미한다.

균열길이와 에너지 방출률, 초음파 감쇠계수와 에너지 방출률의 관계를 이용하여 균열길이와 초음파 감쇠계수와의 관계를 유도하면 다음과 같다.

$$a = -64.648 \left(\frac{\alpha}{L}\right)^2 + 105.905 \left(\frac{\alpha}{L}\right) + 18.537 \quad (10)$$

$$\frac{a}{L} = 0.0002 \alpha^2 - 0.0037 \alpha + 0.0304$$

따라서, 초음파 감쇠계수의 측정이 가능하다면, 식 (9)과 식 (10)을 이용하여 균열길이를 구할 수 있고, 에너지 방출률과 이들의 상호관계의 예측

도 가능하다.

5. 결 론

균질재 DCB 시험편에 대한 균열길이의 변화에 따른 초음파 감쇠계수와 컴플라이언스에 의한 에너지 방출률을 구한 후, 균열길이와 감쇠계수 및 에너지 방출률의 관계를 비교·검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 균열길이가 증가할수록 초음파 에코의 비는 상대적으로 감소하는 반비례 관계이다.

(2) 균열길이에 따른 에너지 방출률은 서로 비례 관계이고, 초음파 감쇠계수가 증가할수록 에너지 방출률은 곡선적으로 증가한다.

(3) 초음파 감쇠계수를 측정하면 균열길이를 구할 수 있고, 에너지 방출률과 이들 상호관계를 예측할 수 있다.

(4) 초음파가 경사 입사할 때 입사각 및 굴절각을 변화하여도 음압의 차이는 미세하여 초음파 감쇠계수에 영향을 미치지 않는다.

후 기

본 연구는 숭실대학교 교내 연구비 지원으로 이루어졌음.

참고문헌

- (1) Chung, N. Y., Park, S. I., Lee, M. D., 2001, "Detection of Interface Crack Using Ultrasonic Method in Adhesively Bonded Joint," *Transaction of the KSME, A*, Vol. 25, No. 3, pp. 415-423.
- (2) Lee, J. H., Choi, S. W., 2000, "Crack Size Determination Through Neural Network Using Back Scattered Ultrasonic Signal," *Transaction of the KSME, A*, Vol. 24, No. 1, pp. 52-61.
- (3) Derouiche, Z., 1995, "Ultrasonic Characterization of Heterogeneous Materials Using a Stochastic Approach," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 97, No. 4, pp. 2304-2315.
- (4) Moriyama, S., Kimura, K., 1998, "Effect of Surface Roughness on Sensitivity of Ultrasonic Normal Beam Testing," *J. JSNT*, Vol. 47, No. 5, pp. 315-321.
- (5) Silk, M. G., 1987, "Change in Ultrasonic Defect Location and Sizing," *NDT International*, Vol. 20, No. 1, pp. 9-14.
- (6) Chiou, C. P., Schmerr, L. W., 1991, "A Quasi-Pulse-Echo Technique for Ultrasonic Flaw Classification," *Ultrasonic*, Vol. 29, pp. 471-481.
- (7) Paradis, L., Srruys, Y., 1986, "A Time-of-Flight Method for Crack Evaluation Using Focused Ultrasonic Probes," *Materials Evaluation*, pp. 568-570.
- (8) Ping, W., Stepinski, T., 2000, "Quantitative Estimation of Ultrasonic Attenuation in a Solid in the Immersion Case with Correction of Diffraction Effects," *Ultrasonics*, Vol. 38, pp. 481-485.
- (9) Albert, S. B., Robert, E. G., 1991, "Ultrasonic Testing," *Nondestructive Testing Handbook*, Vol. 7, pp. 377-390.
- (10) Joseph, L. R., Paul, A. M., 1974, "Ultrasonic Signal-Processing Concepts for Measuring the Thickness of Thin Layer," *ASNT Material Evaluation*, Vol. 32, No. 12, pp. 225-249.
- (11) Djelouah, H., Bocquet, M., 2000, "Application of Ultrasonic Reflection Mode Conversion Transducers in NDE," *NDT&E International*, Vol. 33, pp. 91-99.
- (12) Robert, A. S., 1991, "Practice for the Measurement of the Apparent Attenuation of Longitudinal Ultrasonic Waves by Immersion Method," *ASTM Section 3*, Vol.0303, E.664-78, pp. 263-265.
- (13) Kline, R. A., 1983, "Measurement of Attenuation and Dispersion Using an Ultrasonic Spectroscopy Technique," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 76, No. 2, pp. 498-504.
- (14) Ping, H., Jun, Z., 2001, "Acoustic Dispersion and Attenuation Measurement Using both Transmitted and Reflected Pulses," *Ultrasonics*, Vol. 39, pp. 27-32.
- (15) Badidi Bouda, A., 2003, "Grain Size Influence

on Ultrasonic Velocities and Attenuation," *NDT&E International*, Vol. 36, pp.1~5.

(16) Gross, B. and Srawley, J. E., 1966, "Stress Intensity Factors by Boundary Collocation for

Single Edge Notch Specimens Subject to Double Cantilever Beam Model for Studying Splitting Forces," *NASA Tech. Note*, D-3295.